

교통류의 통계적 해석으로부터 추정된 교량의 응력이력

Stress History of a Bridge Estimated from Statistical
Analysis of Traffic Flow

용	환	선*
Yong,	Hwan	Sun
최	강	희**
Choi,	Kang	Hee
최	성	권***
Choi,	Sung	Kweon

Abstract

The stress history of a bridge is different depending on the characteristic of traffic flow. Because the flow is varied with vehicle type, weight and headway time etc., statistical analysis in bridges is necessary to estimate the history by traffic flow. By applying the statistical analyses in fracture mechanics, the remaining service life of the structure can be estimated. In this paper, 1)the statistical analysis of vehicle type, weight and headway time etc. to analysis randomness of traffic flow, 2)measuring and analysis of stress history of a real bridge, 3)reappearance of stress history by Monte-Carlo Simulation using constitution ratio of vehicle type, weight and headway time as probabilistic variable, 4)comparision of the calculated and modelled stress history, 5)calculation of reduction factor, 6)comparision of frequency of stress range depending on span length etc. were performed. From the results, the basic modelled stress history which is necessary for the method of estimation of the remaining service life of the strucutre could be suggested.

요 旨

교량에 발생하는 응력이력은 교통류(traffic flow)의 성질에 따라 변하며, 교통류는 차종구성율, 차량중량, 차두시간간격(headway time)등에 따라 다르기 때문에 교량과 같은 휨부재에서 교통류에 의한 응력이력을 추정하기 위해서는 통계적 해석이 필요하며, 이것을 파괴역학에 적용함으로써 구조물의 잔존수명을 추정할 수 있을것이다.

본 연구에서는 1)교통류의 불규칙성을 해석하기 위하여 차종구성율, 차량중량, 차두시간간격을 통계적으로 분석 2)실제 교량에서의 응력이력의 측정과 분석 3)차종구성율, 차량중량, 차두시간간격을 확

*정회원 · 수원대학교 공과대학 조교수, 토목공학과

**정회원 · 철도청 시설국장

***정회원 · 한양대학교 대학원

를 변수로 한 Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 응력이력의 재현 4)실측 응력이력과 시뮬레이션한 응력이력의 비교 5)대상교량의 감소계수(reduction factor)의 계산 6)시간길이 변화에 따른 응력범위발생빈도의 비교등을 행하였다. 그 결과 시뮬레이션에 의한 응력이력 추정방법과 구조물의 잔존피로수명 예측에 필요한 기본적인 모형화된 응력이력을 제시하였다.

1. 서 론

반복응력을 받는 교량과 같은 휨부재는 피로의 누적에 따라 수명이 감소하며, 특히 응력집중부나 용접결합부에 국부적으로 피로균열이 발생하면 잔존수명은 급격히 감소한다. 그런데 산업이 발전함에 따라 차량은 중량화 및 고속화하고, 교량에 사용되는 재료는 고강도화되어 단면은 감소되는 추세에 있으나 고강도 강재일수록 용접에 어려움이 있으며, 소재에 관계 없이 용접부의 피로강도는 큰 차이가 없기 때문에 피로는 강교량 파괴의 중요한 원인이 되고 있다⁽¹⁾.

현행 설계법에서는 활하중, 사하중의에 충격계수를 고려한 최대응력하에서 인장파괴가 발생하지 않도록 허용응력을 항복강도 이하로 제한한다. 그러나 피로파괴의 진행은 허용응력범위 이하에서 이루어지기 때문에 교량의 피로수명은 최대응력(peak stress)에 관계없이 응력범위의 발생횟수가 구조물의 피로강도를 지배하는 요소가 된다⁽²⁾. 이러한 이유로 최근에는 실제 교통하중(traffic loading)하에서 교량의 위험단면에 발생하는 피로를 통계적으로 분석하여 이를 파괴역학에 적용하는 방향으로 연구자들의 관심이 모아지고 있다^(3, 4, 5).

강교량에서의 피로파괴 현상은 응력이력에 따르는 시간적 통계현상을 갖기 때문에 확률해석이 가능하고 응력이력은 피로누적현상을 해석하는 기초가 된다. 이때 교통하중에 의한 응력을 지배하는 요인으로는 교량의 형식과 강성이 있으나, 또다른 중요한 인자는 교통류의 성질이며, 이것은 구조물의 누적피로를 규명하는데 중요한 자료가 된다⁽⁶⁾. 교통류는 통과차량의 중량, 차량의 배열, 차두시간 간격등이 통계적 특성을 갖기 때문에 교통류의 통계적 해석을 통하여 응력이력의 추정이 가능하고, 추정된 응력이력이 실측 응력이력과 확률적 특성에서 동일성을 갖는다면 추정된 응력이력을 파괴역학에 적용하는데 있어서 신뢰도를 증진시킬수

있고, 교량의 응력이력을 실측하는 시간적, 경제적 손실을 줄일수 있을것이다.

이에 본 연구는 실험하중하에서의 강교량 부재의 잔존피로수명을 추정하는데 있어서 균열끝 응력장의 지배요소중의 하나인 응력이력을 통계적 해석으로부터 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 교량의 응력이력 측정

2.1 응력범위발생빈도

본 연구에서 응력이력을 측정하기 위한 대상교량은 경부고속도로 선상의 서울에서 이점 100.34km에 위치한 속창교 상행선으로, 1969년6월에 개통된 단순 I형교이며 교량과 빔의 제원은 그림1과 같다.

교량의 교장은 15m, 지간은 14.36m, 응력이력의 측정은 1987년9월, 2일간에 걸쳐 주간과 야간에서

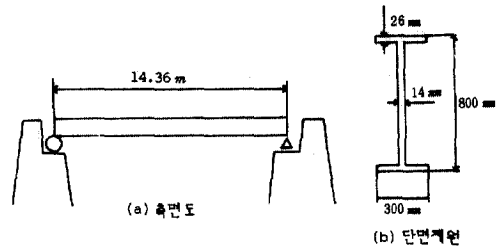
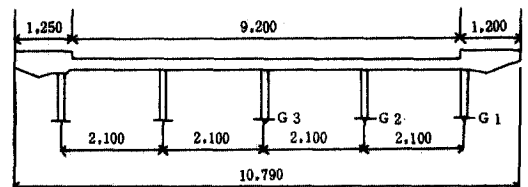


그림 1. 교량의 측면도 및 빔의제원



G1 G2 G3 : 게이지 부착 위치 (단위 : mm)

그림 2. 게이지 부착 위치

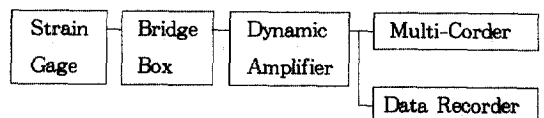


그림 3. 측정 시스템

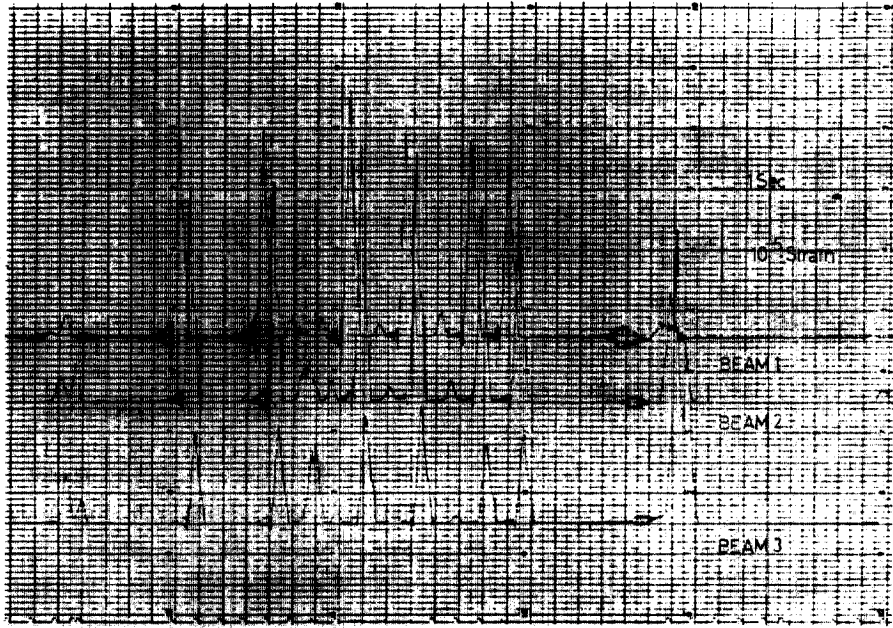


그림 4 측정된 변형율이력

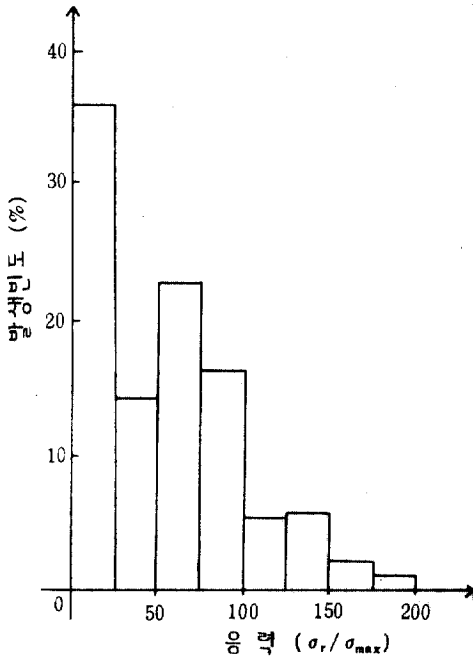


그림 5. 응력범위발생빈도

의 교통량이 가장 많다고 생각되는 오후8시~오후12시, 다음날 오전12시~오후2시까지 6시간 동안 행하였다. 본 연구에서는 교량의 피로에 큰 영향을

주는 대형트럭의 교통량이 가장 많다고 생각되는 오후10시~오후11시까지 1시간 동안의 측정자료를 연구의 주요 대상으로 하였다. 교량 고유의 응력이력은 측정하기 위한 변형률 게이지는 각 주형의 최대응력 발생위치인 시간중앙 플랜지 하부에 부착하였으며, 5개의 주형중에서 외측 2개와 내측 1개의 주형을 대상으로 하였다. 게이지 부착위치는 그림2와 같으며, 그림3은 응력이력을 얻기 위한 측정 시스템이다.

측정 시스템에 의해 기록된 변형율이력이 그림4이며, 이 변형율이력에 탄성계수를 곱하면 응력이력이 된다.

일반적으로 구조물에 발생하는 실동응력이력을 피로현상과 결부시키기 위한 계수 방법에는 응력극치, 중첩, 응력파의 빈도등에 따라 여러가지가 있다. 본 연구에서는 강교량 부재에 발생하는 실동응력을 부분맥동하중(partial pulsating loading)으로 가정하고, 피로수명은 응력범위에 의존하며, 평균응력의 영향이 미미한 점을 고려하여 레인 플로우 계수법(rain flow counting method)을 적용하였다(7).

측정된 응력이력으로 부터 구한 교량중앙 플랜지 하부에 발생하는 응력범위 발생빈도가 그림 5

이다.

그림5의 실측 용력이력중에서 구조물에 균열이 존재하지 않는 경우, 교량의 균열 발생에 영향을 미치지 못한다고 생각되는 $0.25\sigma_{max}$ 보다 작은 용력범위는 삭제(cut off)하고, 최대용력범위 σ_{max} 에 대한 비(σ_r/σ_{max})의 값으로 나타난 무차원 용력범위발생빈도가 그림6이며, 식(1)의 용력범위발생빈도함수를 갖는다.

$$F(X) = -0.948X^3 + 2.987X^2 - 3.202X + 1.178 \quad (0.25 \leq X \leq 1.0)$$

$$= 0 \quad (0 \leq X \leq 0.25) \quad (1)$$

여기에서, $X = \frac{\sigma_r}{\sigma_{max}}$

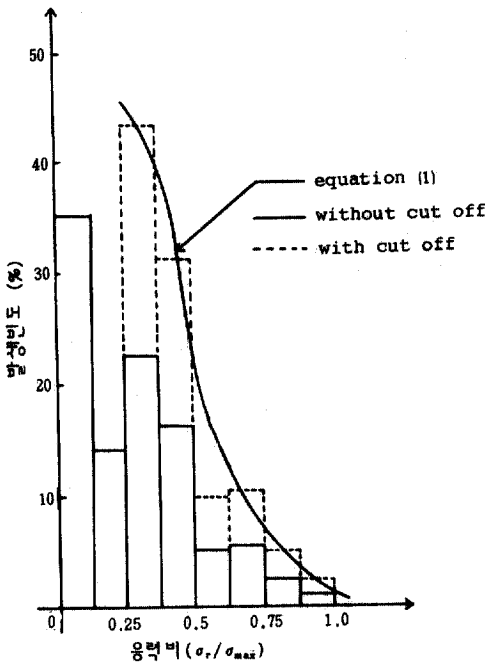


그림 6. Cut off된 용력범위발생빈도

이와 관련해서 Albrecht, P와 Yamada, K가 미국내 54개 교량에서 측정한 용력범위발생빈도함수는 식(2)와 같다⁽⁸⁾.

$$F(X) = 12.0(1.0 - X)^3 + 0.07 \quad (0.25 \leq X \leq 1.0)$$

$$= 0 \quad (0 \leq X \leq 0.25) \quad (2)$$

여기에서, $X = \frac{\sigma_r}{\sigma_{max}}$

2.2 차종구성율

교량에 진입하는 차량의 차종구성율은 차량하중

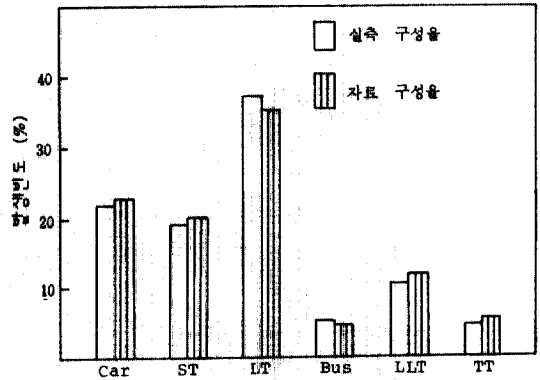


그림 7. 통과 차종별 구성율

의 순서를 결정하는 요소로서 교량이 속한 도로의 등급과 교량의 위치에 관계되며, 연구의 대상교량으로 한정하는 경우에도 주야별로 그 구성율이 변한다. 현재까지의 연구결과 피로누적에 큰 영향을 주는 대형차의 구성율은 시간에 따라 변화하는 혼입률과 연행률에 관계를 갖고있다. 차량의 종류를 소형차(car), 버스(bus), 8톤트럭(LT), 11톤트럭(LLT), 트레일러(TT)로 구분하여 실측한 용력이력으로 부터 차량별 고유용력이력을 분석하여 얻은 속창교의 차종별 구성율과 한국도로공사의 교통량 자료를 기준으로 차량의 증가율을 고려한 통과 차종구성율이 그림7이다⁽⁹⁾.

3. 용력이력의 시뮬레이션

3.1 차두시간간격

차량의 차두시간간격은 차종구성율, 시간당 통과 대수와 관련되는 것으로서 그 분포모델은 차종구성율 자유차와 추종차의 구성, 상대속도의 분포, 교통류의 지체 여부에 따라 달라진다.

Miki등의 연구결과 고속도로 교량에 진입하는 차량의 차두시간간격은 일반적으로 자유도 $n=3$ 인 gamma분포로 가정한다⁽¹⁰⁾. 또, Fisher등은 트럭의 연행만을 기준으로 하는 경우 차두시간간격을 exponential 분포로 가정했다. 그러나 위의 분포함수는 피로누적손상에 영향이 큰 트럭의 교통량만으로 한정된 것인데, 구조물에 균열이 존재하는 경우에는 소형차, 중형차등도 균열성장에 영향을 줄수 있는 용력을 발생시킬 수 있기 때문에 소형차와 중형차의 통행을 고려하면 그 분포함수가 변할 수 있을것이다. 그러나, 국내 고속도로의 차두시간간격에

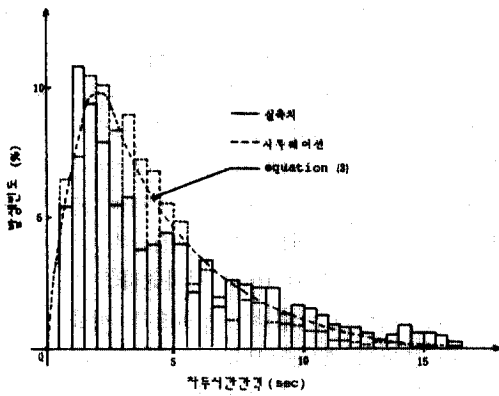


그림 8. 차두시간간격

관한 연구는 아직 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 용력이력 측정과 함께 데이터 레코더에 기록된 차두시간간격으로 부터 빈도분포함수를 구한 결과 차두시간간격은 자유도 $n=4$ 인 식(3)의 Chi-Square 분포였다.

$$f_T(t) = \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} t^{n/2-1} e^{-t/2} \quad (t \geq 0)$$

$$= 0 \quad (\text{elsewhere}) \quad (3)$$

여기에서, $f_T(t)$: t 시간에 도착할 확률밀도

n : 분포함수의 모수

그림8은 실측된 차두시간간격 발생빈도 분포인 Chi-Square분포에 따라 시뮬레이션한 차두시간간격 발생빈도이다.

3.2 차종별 중량 모델

차량의 중량분포는 하중의 크기를 결정하는 요

소로 차량의 종류별로 일정한 분포 형태를 갖는다. 특히 대형트럭의 적재상태는 Goodpasture의 연구 결과 적재된 트럭의 대부분이고 짐을 싣지않은 트럭은 적은 수로서 적재의 상황은 서로 양극단에 분포하고 있음을 지적하였다(11).

일본의 경우 1983년 동명고속도로에서 조사한 바에 의하면 차종별 중량이 트레일러(TT)는 대수정규분포하고 3축대형차(LLT)와 2축대형차(LT)는 정규분포 하는것으로 밝혀졌으며 각 차종에 대한 중량의 평균과 표준편차는 표1과 같다(10).

일본의 자료는 통과차량의 축중(axle weight)을 직접 측정하여 얻은 값들이나 본 연구에서는 통과차량의 축중을 통행제한등의 시행 불가능한 조건 때문에 직접 측정할 수 없었던 관계로 본 연구에서는 차종별 중량을 6가지 형태로 분류하여 용력이력의 시뮬레이션에 사용하였고, 추정된 차량중량은 차량중량과 적재물의 중량을 합한것으로 표2와 같다.

표 1. 차량의 중량 (단위: 톤)

차량의종류	LT	LLT	TT
평균	8.1	17.7	22.2
표준편차	3.2	6.1	9.6

표 2. 차량의 중량 (단위: 톤)

차량의종류	소형차	소형트럭	8톤트럭	버스	11톤트럭	트레일러
차량중량	1.5	7.5	17.2	18.7	23.2	32.4

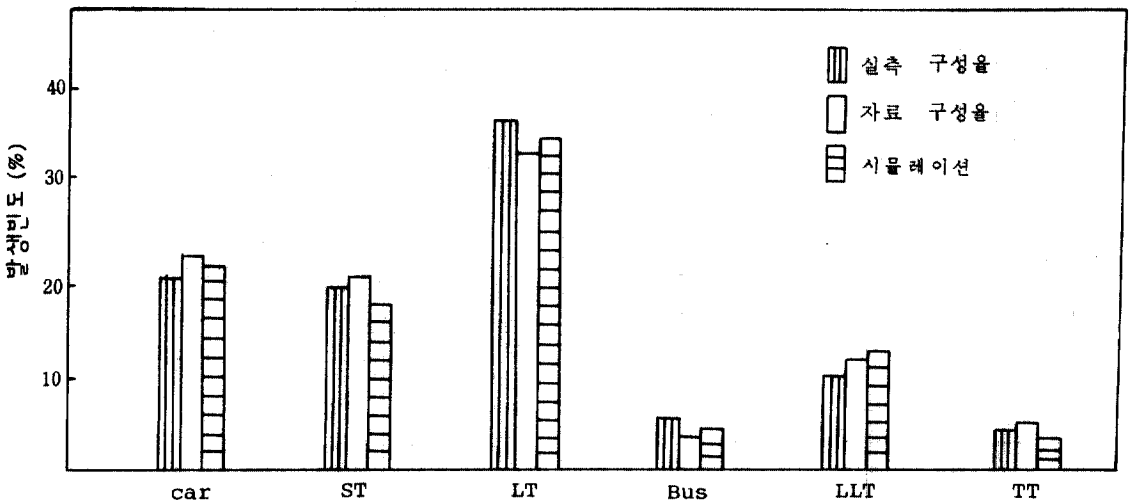


그림 9. 통과 차종별 구성율

3.3 하중열의 시뮬레이션

교량에 진입하는 차량의 순서는 차종구성율에 따른 확률과정이 되고, 차종구성율로부터 랜덤 제너레이션에 의해 차량진입순서가 결정된다. 그림 9는 실측 차종구성율, 교통량 자료, 시뮬레이션에 의해 구한 차종구성율을 비교한 것이다.

3.4 응력감소계수(Stress Reduction Factor)

실제 교량에서 실동하중을 받는 교량의 응력 측정결과와 구조해석에 의한 응력의 계산치는 일치하지 않는다. 이러한 차이는 구조해석 이론의 차이, 실제 구조물의 거동, 충격계수, 주형 사이의 횡분배 하중의 차이, 교량의 형식, 주형의 강성등에 따라 발생한다. 감소계수 $\left(\frac{\text{측정응력}}{\text{계산응력}}\right)$ 는 현재까지의 연구결과 켈틸레버교에서는 0.7, 단순교에서는 0.5, 아치교에서는 0.75이하로 알려져있다⁽¹²⁾. 본 연구 대상교량인 속창교에서의 차량하중에 대한 감소계수의 평균은 0.30, 표준편차는 0.09였다.

3.5 응력이력의 시뮬레이션

차량의 통과에 따라 교량에 발생하는 피로는 특정의 위치에 관계없이 구조물의 위험단면에 관계되는 것으로서, 본 연구에서 차량하중에 의하여 교량에 발생하는 모멘트는 최대모멘트 발생 단면인 시간중양 플랜지 하부부를 대상으로 영향선을 이용하여 계산하였으며, 여러대의 차량이 재하되었을 경우에는 각 모멘트의 합이 교량에 발생하는 모멘

트가 된다. 응력이력의 시뮬레이션시 교량에 진입하는 차량의 길이, 축중, 축간의 거리등은 그림10과 같이 모델화 했으며, 각 차량중량은 차량배열에 따라 표2의 중량을 적용하였고, 3.1의 차두시간간격 시뮬레이션 결과와 3.3의 하중열 시뮬레이션 결과를 데이터로 하는 시뮬레이션에 의하여 모멘트를 발생시켰다. 이때 모멘트 발생 시간간격 Δt 는 0.05 초, 차량의 속도는 100km/h로 청하였다.

그림11은 교량에 발생하는 모멘트를 시뮬레이션 하는 프로그램의 흐름도이다.

시뮬레이션 과정에서 발생시킨 모멘트에 3.4의 감소계수(0.39)를 곱하고, 식(4)에서 교량중양 단면에 발생하는 응력이력을 구할 수 있다. 이때 충격계수는 1.21로 정하였다⁽¹³⁾.

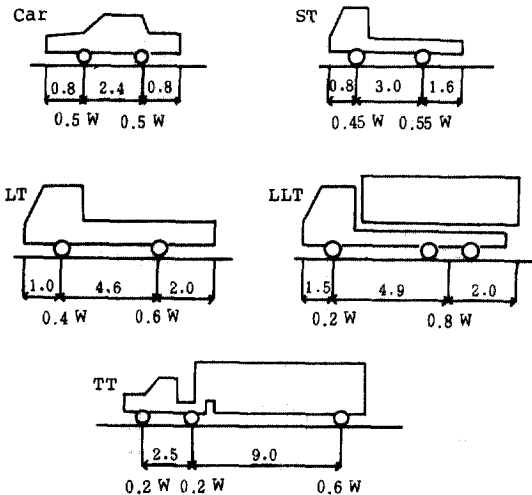
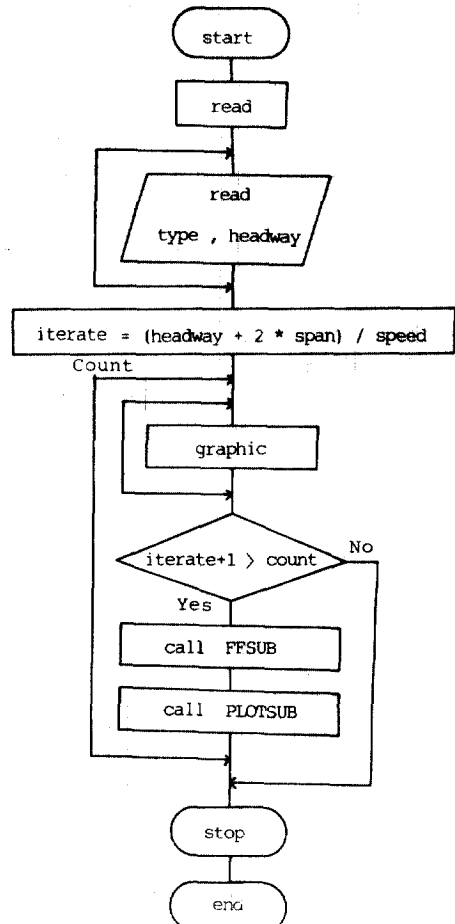
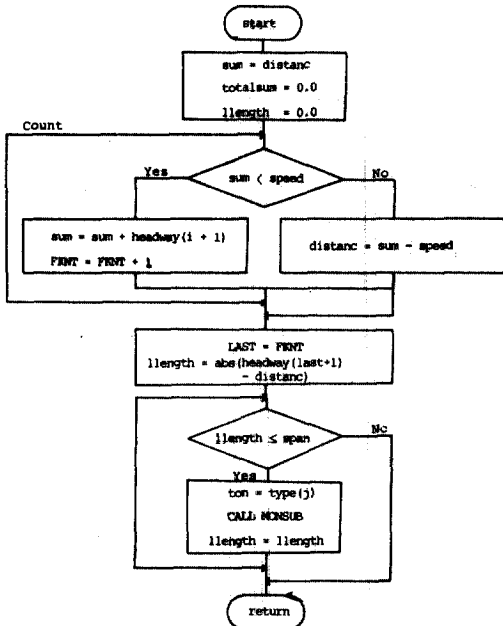


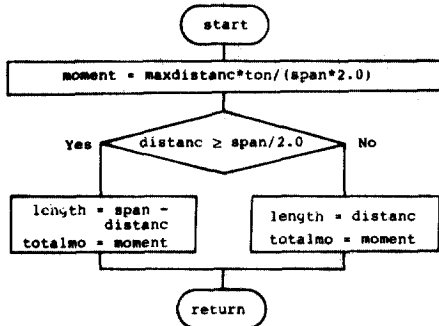
그림 10. 차량의 모델



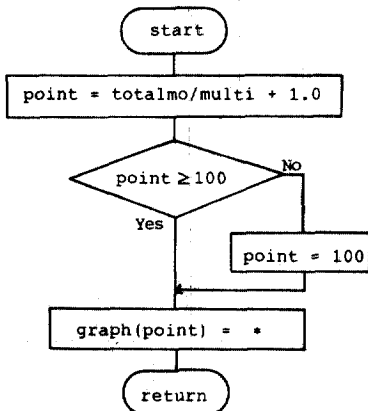
(a)주 프로그램



(b)부 프로그램(FFSUB)



(c)부 프로그램(MONSUB)



(d)부 프로그램(PLOTSUB)

그림 11. 프로그램의 흐름도

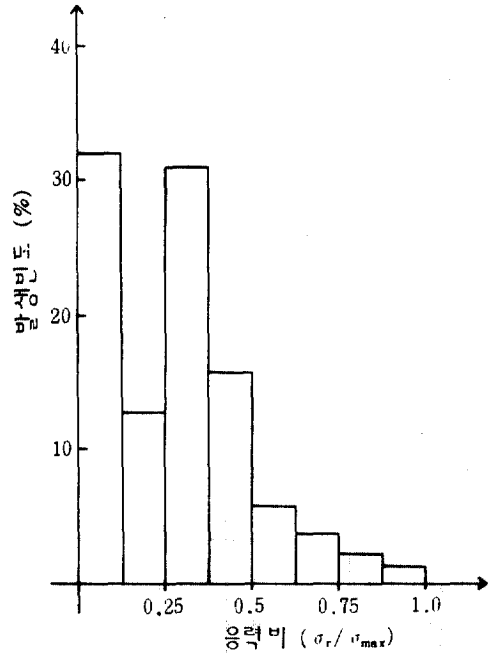


그림 12. 시뮬레이션된 응력범위발생빈도

$$\sigma_r = \frac{Mr(1+i)}{Sx} \frac{S}{6.76} \quad (4)$$

여기에서, S: 평균 빔 간격
 S/6.76: 횡분배계수
 Sx: 단면계수
 i: 충격계수

그림12는 응력이력의 시뮬레이션에서 구한 응력 범위발생빈도이다.

시뮬레이션 결과, 응력범위발생빈도를 그림5의 실측 응력범위발생빈도와 비교하면 σ_{max} 에 대한 응력비의 값이 0.375이하에서는 응력범위발생빈도의 차이가 있으며, 이는 각종 트럭의 적재상태에 따른 영향으로 추정된다.

3.6 시뮬레이션시 시간의 영향

교량 시간의 변화에 따라 교량 부재에 발생하는 변형률 - 시간 곡선의 특성(모멘트의 영향)이 변화하기 때문에 이러한 특성에 의하여 교량에 발생하는 응력범위발생빈도는 변화한다.⁽¹⁴⁾

응력이력의 시뮬레이션시 시간의 변화에 따른 응력범위발생빈도의 변화를 고려하기 위하여 시간을 15m, 30m, 60m로 하여 응력이력을 발생시키고 각 경우의 최대발생응력 σ_{max} 와의 비(σ_r/σ_{max})의 값

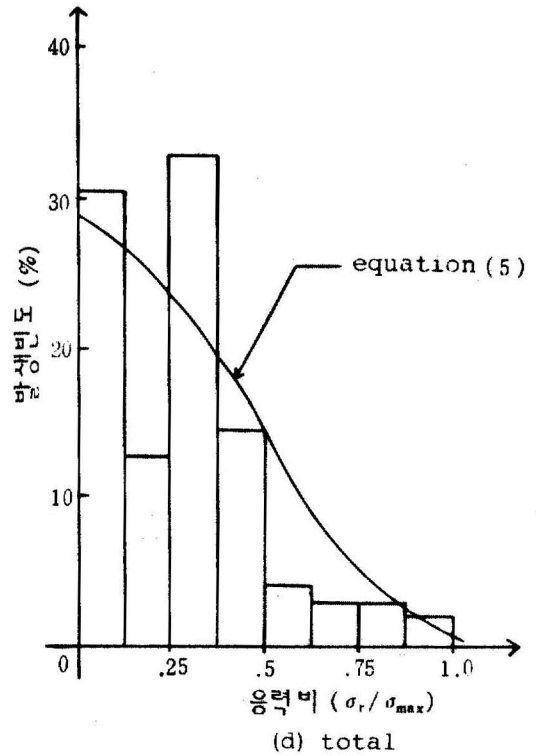
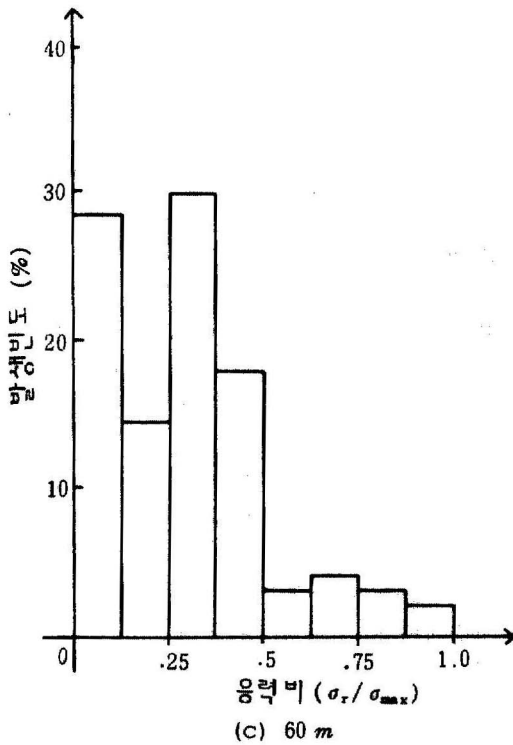
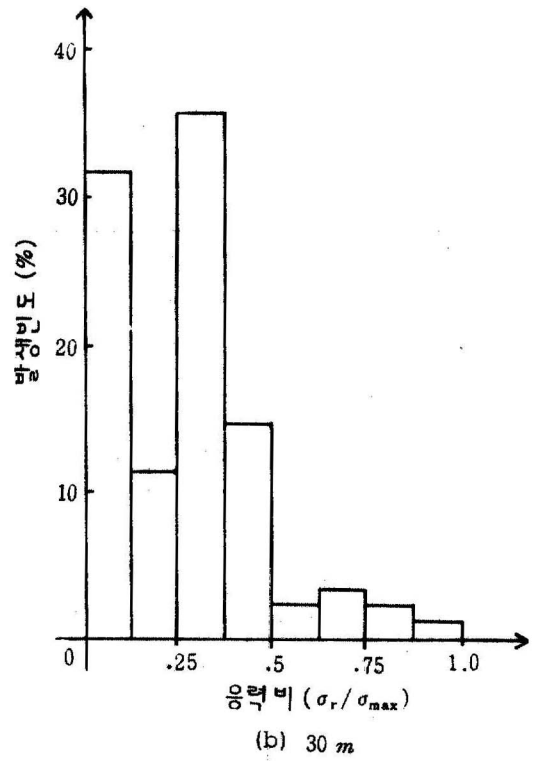
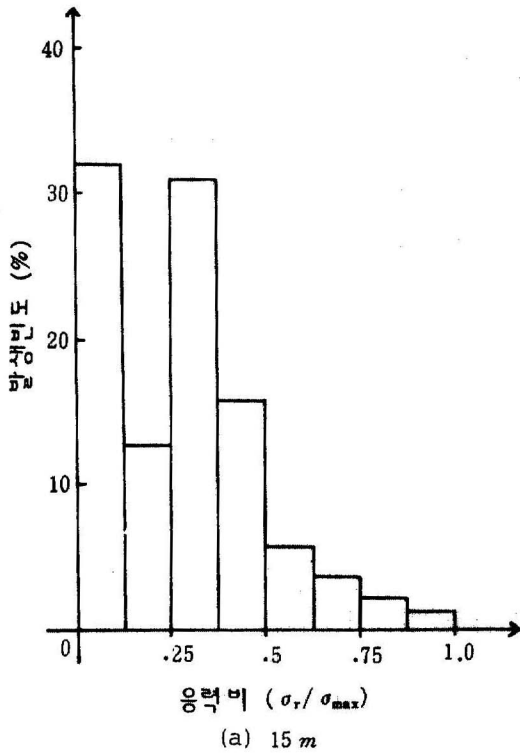


그림13. 지간장에 따른 응력범위발생빈도

으로 나타낸 무차원 응력범위발생 빈도가 그림 13이다.

위의 결과로부터 응력이력의 시물레이션시간의 변화에 대한 응력범위발생빈도는 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, 그림 13에서 (d)의 회귀분석 결과 단순교의 여러 지간에 대한 응력범위발생빈도 함수는 식(5)와 같다.

$$f(X) = 0.827X^3 - 1.188X^2 + 0.131X + 0.256 \quad (0 \leq X \leq 1) \quad (5)$$

$$= 0 \quad (\text{elsewhere})$$

여기에서, $X = \frac{\sigma_r}{\sigma_{max}}$

따라서 최대응력범위를 알 수 있다면 각 응력범위의 랜덤 제너레이션이 가능하다.

4. 결 론

1. 실측 응력범위발생빈도와 Monte Carlo 시물레이션에 의해 추정된 응력범위발생빈도의 비교결과 시물레이션된 응력분포가 실측 응력분포보다 큰 응력분포를 이루고 있음을 알 수 있었으며 이는 통과차량중 트럭의 적재에 따른 영향으로 추정된다.

2. 실측 차두시간간격 분석결과 속창교에서의 차두시간간격은 자유도 $n=4$ 인 Chi-Square 분포를 이루고 있음을 알았다.

3. 속창교에서의 감소계수는 AASHTO시방서의 수치(0.7)보다 Fisher의 이론치(0.5)에 더 가깝게 사료된다.

4. Monto Carlo 시물레이션에 의해 추정된 응력이력은 트럭의 적재에 따른 결과로 인하여 잔존수명 추정시 실측 응력이력보다 안전한 결과치를 얻을 수가 있을 것이다.

5. 단순교에서 지간에 관계없이 응력범위발생빈도 추정식을 구할 수 있었다.

6. 통과차량중 트럭의 적재상태에 대한 정확한 통계적 분포를 알 수 있다면 시물레이션에 의해 정확한 응력이력 추정이 가능하다.

감사의 말씀

본 연구는 1987~89년 한국과학재단의 연구비지원으로 수

행된 1차년도 연구결과와 일부이며 한국과학 재단에 심심한 감사를 드립니다.

參考文獻

1. Yamada K., "Fatigue Behavior of Structural Components Subjected to Variable Amplitude Loading" Thesis of Ph. D, The University of Moryland, 1975.
2. Fisher J. W., "Fatigue Crack Growth in Welded Beam", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol, 5, 1973, pp 415-429.
3. Albrecht P., "Analysis of Fatigue Reliability" Engineering and Physical Sciences Library 20742, The University of Maryland.
4. Ruhl J. A., "Stress History for Highway Bridges Subjected to traffic Loading" Thesis of Ph. D, The University of Illinois ; 1974.
5. Albrecht P., "S-N Fatigue Reliability Analysis of Highway Bridges", *ASTM STP-798*, 1983, pp 184-204.
6. Woodward H. M., Fisher J.W., "High cycle Fatigue of Welded Bridge Details", *Fritz Engineering Laboratory Report*, No 368-12(80)
7. Anzai H., Eudo T., "One-Site Indication of Fatigue Damage under Complex Loading" *INT Jou. of Fatigue*, 1979, pp 49-57.
8. Yamada K, Albrecht P. "Simulation of Service Fatigue Loads for Short-span Highway Bridges", *ASTM STP-671*, 1979.
9. 한국도로공사, "고속도로 교통량 조사", 1986, pp 174-175.
10. Miki C., Goto Y., Mori T., "Computer Simulation Studies on the Fatigue Loak and Fatigue Design of Highway Bridges", *Proc. of JSCE*, Vol 2, No 1, 1985.
11. Goodpasture D. W., "Utilization of Stress History Data in Bridge Design", University of Tenessee, Knoxville, *Civil Engineering Report*.
12. Miki C., Yoshimura Y., "Stress Reduction Factor for Fatigue Assessment of Highway Bridge", *Proc. of JSCE*, No 368, 1987, pp. 341S~349S.
13. AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridge" 1977.

14. Charles G. Schilling, "Stress Cycles for Fatigue Design of Steel Bridges", *Jour. of Structural Engineer-*

Vol 110, No 6, June, 1984.

(接受: 1988. 6. 29)